

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

Ing. Ladislav Macháň

**VYUŽITÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ
KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S MODIFIKOVANOU
CEMENTOVOU MATRICÍ**

**THE USE OF ELECTRICAL PROPERTIES OF COMPOSITES
WITH MODIFIED CEMENT MATRIX**

**ZKRÁCENÁ VERZE DISERTAČNÍ PRÁCE
ABRIDGED DOCTORAL THESIS**

Obor:	Mikroelektronika a technologie
Školitel:	doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
Rok obhajoby:	2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS



**VYUŽITÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ
KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S MODIFIKOVANOU
CEMENTOVOU MATRICÍ**

THE USE OF ELECTRICAL PROPERTIES OF COMPOSITES WITH MODIFIED CEMENT
MATRIX

ZKRÁCENÁ VERZE DISERTAČNÍ PRÁCE

ABRIDGED DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. LADISLAV MACHÁŇ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL ŠTEFFAN, Ph.D.

BRNO 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozitní materiál, modifikovaná cementová matrice, beton, koroze, inhibitory koroze, dynamické zatěžování, laboratorní měřicí aparatura, MSP430, AD5933, monitorovací systém.

KEYWORDS

Composite, modified cement matrix, concrete, corrosion, corrosion inhibitors, dynamic loading, laboratory measuring equipment, MSP430, AD5933, monitoring system.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, Technická 3058/10, 616 00 Brno

OBSAH

1 ÚVOD.....	4
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	4
2.1 Kompozitní materiály	5
2.2 Kompozitní materiály s modifikovanou cementovou matricí.....	5
2.3 Funkční kompozitní materiál	8
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	9
4 NÁVRH, REALIZACE A CHARAKTERIZACE SENZORU	9
4.1 Měření korozního působení v prostředí betonu	9
4.2 Výroba senzoru a jeho mechanické provedení	12
4.3 Integrace senzorů do betonových konstrukcí.....	12
4.4 Měření elektrických parametrů senzorů.....	13
4.4.1 Statická měření elektrických parametrů	13
4.4.2 Dynamická měření elektrických parametrů	14
4.4.3 Dlouhodobá měření elektrických parametrů	18
5 LABORATORNÍ MĚŘICÍ APARATURA.....	20
6 MONITOROVACÍ SYSTÉM.....	23
6.1 Měřicí bod	24
6.2 Komunikační ústředna	25
6.3 Aplikace pro PC	26
ZÁVĚR.....	27
7 POUŽITÁ LITERATURA.....	29

1 ÚVOD

Materiály s cementovou matricí jsou lidstvu známy již z období antiky, kdy římsí stavitelé začali používat přírodní hydraulický cement „pucolán“, který vzniká jako vedlejší produkt sopečné činnosti. Objev hydraulického betonu umožnil vznik významných antických inženýrských staveb, akvaduktů a mostů. Se zánikem říše římské byla znalost využití hydraulických pojiv ztracena téměř na tisíc let. Znovuobjevení betonu nastalo až v období novověku, kdy v roce 1756 britský inženýr John Smeaton poprvé použil jako hydraulické pojivo tzv. „Portlandský cement“. Od té doby prodělal vývoj betonu prudký vzestup a z betonu se stal jeden z nepoužívanějších stavebních materiálů současnosti [1].

I přes velkou odolnost betonu dochází vlivem mechanického namáhání, chemické koroze a eroze povrchu k postupné degradaci jeho vlastností. U exponovaných staveb jako jsou přehrady, mosty, skelety budov apod., je klíčová dlouhodobá bezpečnost provozu. Stav těchto konstrukcí musí být pravidelně kontrolován a monitorován. Pro kontroly se používají defektoskopické metody založené na akustickém principu [2], na principu počítačové rentgenové tomografie [3] nebo elektrické odporové tomografie [4]. Pro dlouhodobé monitorování struktur se využívají tenzometrické systémy založené buď na piezoelektrickém elementu integrovaném v objemu [5], nebo nejčastěji odporové tenzometry umístěné na povrchu materiálu.

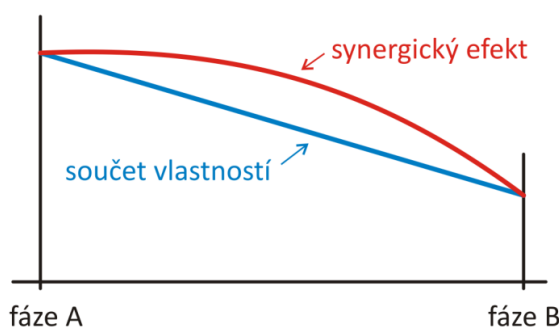
Nevýhody konvenčních způsobů monitorování vedly k myšlence vytvořit elektrický senzor, který by umožňoval měřit namáhání betonu v objemu materiálu, jehož výroba by byla levná, ekologická a technologicky slučitelná s výrobou betonu. Možnost nepřetržitého sledování pochodů uvnitř objemu materiálu s využitím elektrických parametrů materiálu je benefitem, který umožňuje včas reagovat na případné strukturální poruchy a včasnou sanací materiálu předcházet katastrofálním následkům selhání. Výzkumu materiálů s modifikovanou cementovou matricí se již řadu let věnují vědci na předních světových pracovištích. Záměr využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí za účelem zvýšení bezpečnosti stavebních konstrukcí z betonu může znamenat obrovský celospolečenský přínos.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Problematiku kompozitních materiálů, která se váže k tématu dizertační práce, lze rozdělit do tří tematických celků. První část tvoří obecné kompozitní materiály. Jejich rozdělení a vysvětlení názvosloví se věnuje kapitola 2.1. Druhá část (kapitola 2.2) se věnuje rozboru plniv a výztuží, která umožňují měnit výsledné mechanické a elektrické vlastnosti kompozitního materiálu s cementovou matricí. Kapitola 2.3 popisuje konkrétní recepturu výroby funkční kompozitní směsi, která po vytvrzení reaguje na mechanické namáhání výraznou změnou reálné složky elektrické impedance.

2.1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál (kompozit) je vícefázový technický materiál složený ze dvou nebo více fází s rozdílnými vlastnostmi. Jejich složením vzniká materiál s novými vlastnostmi, kterých sama o sobě nedosahuje ani jedna z použitých fází – synergický (spolupracující) efekt (obr. 1). Použité materiály se v makroměřítku liší tvarem nebo složením, ale v rámci kompozitu si zachovávají svoji identitu i přes to, že na své okolí působí v součinnosti. Nedochází k úplnému rozpouštění, nebo slučování a každá z fází může být fyzikálně identifikována [6].



Obr. 1 Synergický efekt [6]

Tvrďší a pevnější nespojitá fáze kompozitu bývá označována jako výztuž. Typickým příkladem výztuže jsou různá vlákna či tkaniny, které dodávají kompozitu vlastnosti spojené s vysokou pevností v tahu (skleněná, uhlíková, aramidová). Spojitá a poddajnější fáze, která zastává funkci pojiva výztuže, bývá označována jako matrice. Matrice udává výsledný tvar kompozitu a zajišťuje přenos zatížení do vyztužující fáze. Vícefázový materiál může být označen kompozitem, pokud je podíl výplně větší než 5 %, je připraven smícháním složek a má odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti výztuže a matrice [7]. Většina uspořádání kompozitních materiálů vyvolává anizotropii. Anizotropie může být pro některé aplikace žádoucí (lopatky rotoru, luk) a je jí záměrně využíváno. Pokud je anizotropie nežádoucí, může být potlačena vhodným uspořádáním fází (laminát, překližka).

2.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S MODIFIKOVANOU CEMENTOVOU MATRICÍ

Nejpoužívanějším kompozitním materiálem v oblasti stavitelství je beton. Matrice betonu je tvořena cementem, který plní funkci hydraulického pojiva. K hydraulickému tvrdnutí cementu dochází důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů (křemičitanů a hlinitanů). Po vytvrzení vlivem hydratačních procesů a reakcí je materiál pevný, stálý a odolný proti působení vody. Do cementové matrice jsou přidávána plniva, která určují výsledné mechanické vlastnosti betonu. Základními plnivy je písek a kamenivo s různou velikostí frakce. Kamenivo tvoří až 80 % celkového objemu směsi. Díky vzájemnému opření a zaklínění jednotlivých zrn vzniká pevná vrstva odolná v tlaku [8]. Výrazného zvýšení pevnosti betonu v tahu lze docílit přidáním betonářské výztuže ve formě

drátů, sítí a rohoží. Takto vzniklé kompozitní materiály jsou jednotně nazývány železobetonem.

Modifikací cementové matrice přidáním vláken vzniká speciální typ betonu – vláknobeton. Díky synergickému efektu získává beton plněný vlákny výhodné vlastnosti v podobě omezení vzniku trhlin v objemu materiálu při tepelném nebo mechanickém namáhání, zvýšení odolnosti proti průniku vody a zlepšení jakosti povrchu. Výztuž může být tvořena ocelovými, skleněnými, syntetickými či uhlíkovými vlákny. Pro výsledné mechanické vlastnosti je důležité rovnoměrné rozptýlení vláken v objemu materiálu a jejich orientace. Pro některé aplikace je výhodná anizotropie mechanických vlastností, kterou způsobuje náhodná poloha vláken. Pro dosažení izotropních mechanických vlastností lze vlákna do matrice ukládat s jednotnou orientací, ve svazcích nebo v tkaninách.

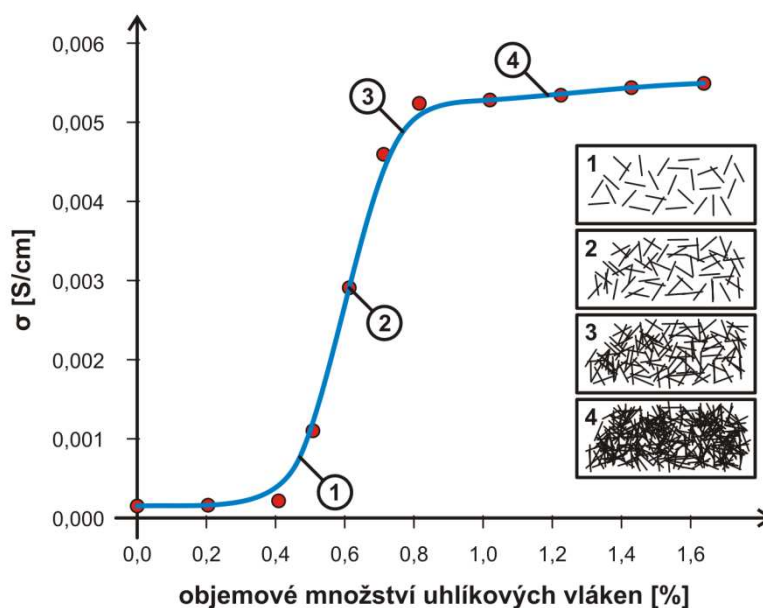
Elektrická rezistivita cementové matrice je po vytvrzení a vyzrání přibližně $5 \times 10^3 \Omega \cdot m$ [9]. Přidáním anorganických složek plniva rezistivita kompozitního materiálu ještě vzroste. Vzhledem k velmi nízké hodnotě měrné elektrické vodivosti může být beton považován za izolant. Zajímavé elektrické vlastnosti mohou být získány přidáním vodivých plniv do cementové matrice. Ideálním materiálem, který je velmi dobře vodivý, chemicky odolný a snadno dostupný, je uhlík. Uhlíkový materiál lze obstarat v různých formách. Některé formy uhlíku jsou průmyslově vyráběné (vlákna, tkaniny, vločky), jiné vznikají jako vedlejší produkt průmyslové výroby a jsou odpadním materiálem (saze).

Kompozitní materiál s modifikovanou cementovou matricí vykazuje závislost elektrické rezistivity na změně teploty, mechanickém namáhání nebo na strukturálních poruchách v objemu materiálu. Na kovových elektrodách, zapuštěných do objemu materiálu, dochází ke generování velmi malých termoelektrických napětí vlivem Seebeckova jevu. V závislosti na plánovaném způsobu využití materiálu lze způsobem přípravy, použitou recepturou a obecně materiálovým složením zvýšit závislost rezistivity na změně požadované veličiny.

Elektrickým vlastnostem materiálu a možnosti jejich využití se věnuje autorka D. L. L. Chung v [9], [10], [11], která zkoumala vliv krátkých ocelových a uhlíkových vláken na elektrické vlastnosti kompozitu. Výsledky poukazují na zvýšení piezorezistivní schopnosti materiálu vlivem přidání krátkých uhlíkových vláken. Touto modifikací cementové matrice výrazně stoupla citlivost na mechanické namáhání a vznik strukturálních poruch v objemu materiálu.

Autoři článků [12] a [13] zkoumali vliv uhlíkových vláken na vodivost kompozitu. Došli k závěru, že na vztah mezi vodivostí a objemovým množstvím uhlíkových vláken lze aplikovat statistickou perkolační teorii [14]. Aplikaci perkolační teorie na vodivost materiálu publikoval již v roce 1973 fyzik Scott Kirkpatrick [15]. Perkolační teorie se zabývá pravděpodobností, s jakou se vodivé částice, náhodně rozmístěné v jednotkovém objemu izolantu, vzájemně dotknou a vytvoří elektricky vodivou cestu z jedné strany materiálu na druhou (stranová perkolace) [16]. Při velmi malém objemovém množství jsou vodivé částice náhodně rozptýleny v objemu materiálu tak, že se téměř vzájemně nedotýkají. Pokud ano,

tak jsou tvořeny pouze velmi malé oblasti s vysokou elektrickou vodivostí, které k celkové vodivosti materiálu přispívají pouze nepatrně (obr. 2 – detail 1). Postupným zvyšováním objemového množství vodivých částí dochází k tvorbě a postupnému zvětšování shluků (clusterů). Vodivost v rámci jednoho shluku je vysoká, protože se částice vzájemně dotýkají. Mezi jednotlivými shluky a volnými vodivými částicemi v jejich blízkosti se začíná uplatňovat princip vodivosti materiálu založený na tunelování a vzájemných přeskocích elektronů (obr. 2 – detail 2). Dalším zvyšováním množství vodivých částic v objemu materiálu nastává prudký nárůst vodivosti. Koncentrace vodivých částic dosáhla tzv. „perkolačního prahu“. Prudký nárůst vodivosti je způsoben zvětšováním vodivých shluků a jejich vzájemným vodivým dotykům.



Obr. 2 Závislost měrné elektrické vodivosti materiálu na objemovém množství uhlíkových vláken [12]

Při dalším zvyšování koncentrace vodivých částic začíná nad mechanismem vodivosti v podobě tunelování a přeskoků elektronů převládat vzájemný ohmický kontakt (obr. 2 – detail 3). Dochází k vytvoření ohmicky vodivé cesty z jedné strany objemu materiálu na druhou. Celková vodivost materiálu je v tomto případě vysoká a s dalším zvyšováním množství vodivých částic roste již jen velmi málo (obr. 2 – detail 4). V této oblasti se již uplatňuje pouze vliv snižování ohmického odporu vlivem paralelního řazení jednotlivých vodivých cest [12].

Autoři Sihai Wen a D. L. L. Chung prováděli ve své práci [17] sérii měření, která prokázala, že pro dosažení co nejlepších piezorezistivních vlastností materiálu je důležité, aby se koncentrace vodivých příměsí v cementové matici pohybovala pod perkolačním prahem. Problémem přípravy takového materiálu je fakt, že díky velkému sklonu závislosti vodivosti materiálu na objemovém množství vodivých částic, dochází velmi malými odchylkami koncentrace vodivých příměsí k velkým změnám vodivosti. Ke stejnému závěru došli i autoři článků [18], [19], [20] a [21].

2.3 FUNKČNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁL

Složení směsi funkčního kompozitního materiálu vychází z receptury, která je chráněna užitným vzorem [22] a patentem [23]. Receptura vznikla jako výstup z projektu „Multifunkční kompozity mimořádných vlastností na bázi anorganických nanosložek (KOMPOZITY)“. V tematicky navazujícím projektu „Sledování stavu stavebních konstrukcí pomocí elektricky vodivých prvků s modifikovanou cementovou maticí“ byla původní receptura upravena. Kompozitní materiál, připravený podle nové receptury, vykazoval velkou citlivost změny elektrických parametrů na mechanické namáhání materiálu, přičemž byla ovlivňována zejména reálná složka komplexní impedance. Receptura nového složení materiálu je chráněna užitným vzorem [24], který vznikl jako jeden z výstupů projektu. Materiálové složení receptury je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1 Receptura pro přípravu směsi SK9-1 [24]

Složka směsi	Typ, výrobce	Navážka [g]	Hmotnostní podíl [%]
portlandský cement	CEM I 52,5, Mokrý	1000	56,8 %
jemnozrnný písek	slévárenský B30, Bzenec	640	36,4 %
uhlíkové vlákno	KRECA 10 mm	14	0,8 %
uhlíkové částice	saze B	106	6,0 %
superplastifikátor	Glenium ACE 442	50	–
voda záměsová	1. dávka	600	–
voda k doředění	2. dávka	200	–

Výrobní postup přípravy směsi byl následující. V nádobě planetového mixéru byl nejprve po dobu dvou minut mísen písek se sazemí. Do této suché směsi byl přidán cement a mísení pokračovalo další dvě minuty až do důkladné homogenizace. Poté byla přidána první záměsová dávka vody. Mísení pokračovalo přibližně tři minuty. Podle potřeby byla směs doředována pomocí druhé záměsové dávky vody. Do mokré, homogenní směsi písku, sazí a cementu byla postupně přidávána uhlíková vlákna. Následovalo mísení až do důkladné homogenizace směsi. Vlivu mísicí procedury a teploty směsi na výsledné elektrické vlastnosti kompozitu s uhlíkovými vlákny se věnuje [25]. Po nalití směsi do připravených forem a vložení elektrod byla směs vibrována přibližně po dobu jedné minuty. U prvních vyrobených vzorků byla provedena analýza dispergace jednotlivých složek kompozitu v objemu materiálu. Cílem bylo zjistit, zda výše popsaná technologie přípravy směsi zajišťuje rovnoměrné rozptýlení složek a jejich náhodnou orientaci. Byl proveden mikrovýbrus vzorku, který potvrdil, že je postup výroby správný.

Vzhledem k velmi zajímavým vlastnostem nového materiálu, který byl doposud testován pouze v laboratorních podmínkách, se nabízela možnost prozkoumat možnosti jeho praktického využití. Praktickému využití směsi SK9-1 pro výrobu senzorů citlivých na mechanické namáhání se věnuje kap. 4 .

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Práce se zaměřuje na praktické využití cementového kompozitního materiálu, který byl dosud testován pouze v laboratorních podmínkách. Na základě současného stavu problematiky byly stanoveny tyto cíle:

- 1) návrh, realizace a charakterizace senzoru:
 - a) měření korozního působení v prostředí betonu (koroze kovových materiálů, vliv inhibitorů na korozi kovových materiálů, koroze uhlíku),
 - b) návrh fyzické podoby senzoru (tvar a rozměry senzoru, provedení elektrodového systému),
 - c) návrh fyzické podoby betonových prvků pro integraci senzorů (volba rozměrů a způsobu umístění senzorů v objemu materiálu s ohledem na dynamické zatěžování),
 - d) měření elektrických parametrů vyrobených senzorů (měření statických elektrických vlastností, dynamické zatěžování betonových prvků s integrovanými senzory a sledování elektrické odezvy, dlouhodobé měření elektrických parametrů),
- 2) vývoj měřicího přístroje pro charakterizaci betonových kompozitních materiálů:
 - a) návrh a konstrukce přístroje založeného na integrovaném převodníku impedance,
 - b) návrh a konstrukce laboratorní měřicí aparatury založené na novém měřicím principu,
- 3) vývoj monitorovacího systému pro praktickou aplikaci senzorů založených na kompozitním materiálu s modifikovanou cementovou maticí:
 - a) návrh topologie systému,
 - b) návrh a konstrukce jednotlivých součástí,
 - c) vývoj aplikace pro zobrazení výstupů z monitorovacího systému.

4 NÁVRH, REALIZACE A CHARAKTERIZACE SENZORU

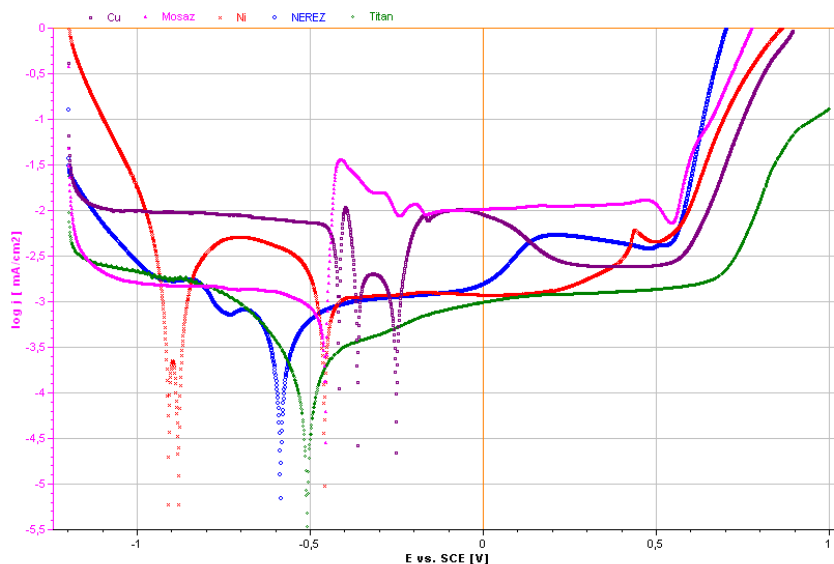
Experimentální část práce, popsaná v této kapitole, je zaměřena na praktické využití materiálu popsaného v kap. 2. Cílem bylo vytvořit senzor citlivý na zatížení, který bude možné integrovat do objemu materiálu betonového prvku. Kap. 4.1 se zabývá korozním působením silně alkalického prostředí betonu na vybrané materiály, které jsou buď obsaženy ve složení směsi funkčního materiálu, nebo slouží pro vytvoření elektrodového systému. Mechanické provedení senzoru je popsáno v kap. 4.2. Integrací vyrobených senzorů do betonových prvků se zabývá kap. 4.3. Takto vyrobené konstrukční celky byly podrobeny různým měřením, při kterých byly sledovány elektrické parametry senzorů. Výsledky měření jsou zpracovány v kap. 4.4.

4.1 MĚŘENÍ KOROZNÍHO PŮSOBENÍ V PROSTŘEDÍ BETONU

Úkolem elektrodového systému ve struktuře betonového kompozitního materiálu je vytvořit stabilní elektrický kontakt. Na rozhraní mezi betonovým materiálem

a kovem dochází k degradačním procesům, způsobeným prostředím silně alkalického elektrolytu. Chemická koroze v prostředí betonu způsobuje samovolné rozpouštění kovového materiálu, které může být ještě urychleno přiložením elektrického napětí. Rychlost samovolného rozpouštění je závislá i na mobilitě iontů uvnitř betonu, která souvisí s jeho vlhkostí.

Prostředí betonu lze simulovat pomocí roztoku 0,01 mol/l NaOH, nasyceného hydroxidem vápenatým – $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Výsledky měření pomocí potenciodynamických metod jsou silně závislé na konfiguraci měřicího systému a vnějších vlivech (teplota, vzájemná poloha měřicích elektrod v pracovní komoře, průtok inertního plynu atd.). Aby bylo možné výsledky měření pro jednotlivé vzorky porovnat, musely být předem stanoveny parametry měření. Při vzájemném porovnání naměřených potenciodynamických křivek mědi, mosazi, niklu, nerez a titanu uvedených na obr. 3, lze rozlišit kovy, které vykazují buď jedno, nebo tři vychýlení. Kovy, v jejichž charakteristice jsou tři vychýlení, přecházejí ze základního stavu do oxidované formy, přes formu hydroxidu (měď a nikl).



Obr. 3 Vzájemné porovnání potenciodynamických křivek vybraných kovů

Z provedeného měření se jako nejlepší a cenově nejvýhodnější kovový materiál pro elektrodový systém jeví nerez. U nerez byla zjištěna podobná korozní odolnost jako u titanu. Titan je však podstatně dražší materiál a díky příznivým vlastnostem nerez není pro jeho použití důvod. Nevýhodou nerez je jeho nepoddajnost a obtížná tvarovatelnost. Nerez nelze pájet pomocí měkké pájky.

Zajímavým materiálem pro tvorbu elektrodového systému je měď. Její výhodou je snadná dostupnost, dobrá tvárnost, vynikající pájitelnost a velmi malý ohmický odpor. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiálů nejen v elektrotechnice, ale i ve strojírenství. Měď lze obstarat v různých formách a tvarech (drát, kulatina, trubka, plech, síťovina). Chování mědi v korozivním prostředí betonu není ideální a při jejím využití lze očekávat sníženou životnost elektrodového systému. Následující měření měla za úkol vyzkoušet, zda je možné korozní odolnost mědi pozitivně ovlivnit použitím inhibitorů koroze.

Na základě předchozích zkušeností pracovníků Ústavu elektrotechnologie s inhibitory koroze v oblasti Ni-Zn akumulátorů byla pro testování vlivu vybrána tato aditiva: Lugalvan G35, Lugalvan P, Slovasol 2520/2, CTAB a Tween 20. Měření korozní odolnosti s aditivou probíhalo za stejných podmínek, za kterých byly provedeny testy korozní odolnosti jednotlivých kovů. Díky tomu bylo možné vzájemně porovnat výsledky měření a posoudit vliv použití konkrétního aditiva na korozní odolnost. Z naměřených potenciodynamických křivek bylo patrné, že aditiva výrazně ovlivňují kinetiku elektrodových reakcí. Aditiva Slovasol 2520/2, Lugalvan G-35 a Tween pravděpodobně způsobila zvýšenou pasivaci povrchu elektrody, naopak aditiva Lugalvan P a CTAB pasivaci bránila. Vzhledem k velké složitosti měřeného systému nebylo pomocí výše uvedeného měření identifikovat všechny procesy elektrodového rozhraní včetně působení povrchově aktivních látek.

Pro ověření hypotéz o vlivu aditiv na korozní odolnost mědi byl proveden dlouhodobý expoziční test, při kterém byly vzorky mědi ve formě plíšků ponořeny v roztoku simulujícím korozní prostředí betonu po dobu 140 hodin. Do každého simulačního roztoku byl přidán jiný druh aditiva v koncentraci 500 ppm. Teplota roztoku byla zvýšena na 60°C a měření probíhalo bez přiloženého potenciálu.

Z naměřených hodnot počáteční hmotnosti, hmotnosti po expozici a hmotnosti po odstranění oxidové vrstvy byly vypočteny hodnoty nárůstu hmotnosti vlivem oxidace a poklesu hmotnosti vzorku po odstranění oxidové vrstvy. Výsledky jsou shrnuty v tab. 2.

Tab. 2 Výsledky expozičního testu

aditivum	počáteční hmotnost [g]	hmotnost po expozici [g]	nárůst hmotnosti [mg]	hmotnost po stripování [g]	pokles hmotnosti [mg]	poměr poklesu a nárůstu
TMT	2,0470	2,0586	11,6	2,0130	45,6	0,254
Cu bez aditiva	2,0300	2,0378	7,8	2,0164	21,4	0,364
gal. Cu bez aditiva	2,0266	2,0341	7,5	2,0111	23,0	0,326
Lugalvan P	2,0125	2,0202	7,7	2,0001	20,1	0,383
Tween 20	2,0241	2,0301	6,0	2,0085	21,6	0,278
Alfonal K	2,0254	2,0310	5,6	2,0089	22,1	0,253
CTAB	2,0313	2,0369	5,6	2,0204	16,5	0,339
Spolapon AES 232	2,0338	2,0388	5,0	2,0260	12,8	0,391
Lugalvan G-35	2,0144	2,0173	2,9	2,0030	14,3	0,203
Slovasol 2520/2	2,0183	2,0183	0	2,0183	0	-

Výsledkem expozičního testu je jednoznačné zjištění, že při použití aditiva Slovasol 2520/2 dochází ke kompletní inhibici oxidačních dějů na povrchu mědi. Použití tohoto aditiva pro potlačení změn na rozhraní měď – prostředí betonu, se jeví jako nejvýhodnější. Aditivum Slovasol 2520/2 bylo přidáno do směsi pro výrobu senzorů, opatřených měděnými kontakty. Výroba senzorů je popsána v kapitole 4.2.

4.2 VÝROBA SENZORU A JEHO MECHANICKÉ PROVEDENÍ

Výhodou senzoru, vyrobeného z funkčního kompozitního materiálu, je možnost vytvořit jeho tvar s ohledem na požadovanou aplikaci a účel využití. Pro výrobu senzorů určených pro testování elektrických parametrů v závislosti na mechanickém namáhání bylo výhodné připravit vzorky ve tvaru kvádrů o rozměrech $100\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ s elektrodami umístěnými ve vzdálenosti 1,5 cm od obou konců vzorku. Pro výrobu vzorků byly použity již existující kovové formy, které se používají pro výrobu zkušebních vzorků z konvenčních materiálů. Na základě výsledků korozních testů, uvedených v kap. 4.1, byla jako materiál pro vytvoření elektrod vybrána měď ve formě drátu o průměru 1,7 mm. Materiál byl obstarán ve formě elektroinstalačního kabelu. Izolace byla na části drátu ponechána jako ochranná vrstva, která zabraňuje znečištění a korozi vnější části elektrody během formování a zrání kompozitního materiálu. Pro zvýšení korozní odolnosti mědi v alkalickém prostředí betonu bylo do směsi přidáno aditivum Slovasol 2520/2 v koncentraci 500 ppm, které se v korozním testu projevilo jako velice účinný inhibitor koroze. Připravená směs byla nalita do forem, kde byla vibračně zhutněna. Po vytvrdnutí směsi byly senzory vyjmuty z formy a ponechány při běžné pokojové teplotě a vlhkosti vyžrát po dobu 28 dní. Připojení kabelů bylo provedeno pomocí nasouvacích svorek „WAGO“, které díky svému nožovému systému kontaktů zajišťují stabilní a trvalý elektrický kontakt mezi kabelem a elektrodami senzoru. Pro lepší mechanickou odolnost kontaktů byly svorky a kabely zajištěny pomocí tavného lepidla (obr. 4).



Obr. 4 Vyrobený senzor a detail způsobu připojení vodiče k elektrodám

Takto vyrobené senzory z funkčního kompozitního materiálu byly připraveny pro měření statických elektrických parametrů a následnou integraci do betonových konstrukcí. Mechanické provedení senzoru jako jeden z výstupů dizertační práce, je chráněno užitečným vzorem [24].

4.3 INTEGRACE SENZORŮ DO BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Jednou z největších výhod využití senzorů z funkčního kompozitního materiálu je možnost jejich integrace do objemu materiálu. Díky tomu lze sledovat vliv zatížení, nebo mechanického namáhání přímo uvnitř jednotlivých konstrukčních prvků. Pro vytvoření testovacích těles, sloužících k ověření funkce vyrobených

senzorů, popsaných v kap. 4.2, byly zvoleny dva základní konstrukční prvky – pilíř a nosník. Rozměry obou prvků byly přizpůsobeny technologickým možnostem brněnské pobočky státního podniku TZÚS Praha (Technický a zkušební ústav stavební Praha). Pilíř o rozměrech 500 mm × 300 mm × 300 mm s vnitřní drátěnou výztuží z betonářské oceli B500B byl vyroben z betonu C25/30-XC1. Nosič o rozměrech 3400 mm × 150 mm × 150 mm s vnitřní drátěnou výztuží z betonářské oceli B500B byl vyroben z betonu C16/20-XC1.

Drátěná výztuž a senzory byly v objemu prvků upevněny pomocí plastových distančních prvků, lišt a fixačních pásků, které měly za úkol udržet komponenty ve správné poloze během formování a tvrdnutí betonu. Použitím poddajných plastů bylo docíleno minimálního vlivu fixace na výsledné rozložení sil během testování betonového prvku. Pro konstrukci forem byla použita dřevotříska s hladkou vrstvou lamina, která má separační funkci, zabraňuje vsakování vody do stěn formy a napomáhá snadnému oddělení při rozebírání formy. Po zalití formy betonem a jeho ztuhnutí pomocí vibrování byly prvky ponechány v klidu až do úplného vytvrzení. Poté byly formy rozebrány a prvky očištěny. Před měřením elektrických vlastností při zatěžování (kap 4.4) byly takto vyrobené prvky ponechány po dobu 28 dní vyzrát.

4.4 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ SENZORŮ

Měření elektrických parametrů senzorů lze rozdělit do tří skupin. U všech vyrobených senzorů byly nejprve změřeny elektrické parametry ve statickém režimu. Toto výchozí měření sloužilo k ověření funkčnosti elektrodového systému a rozřídění senzorů do skupin dle velikosti reálné složky komplexní impedance (kap. 4.4.1). Po integraci vyrobených senzorů do betonových prvků byla provedena série měření elektrických parametrů při dynamickém namáhání prvků s cílem zjistit velikost elektrické odezvy na působení mechanického napětí v objemu materiálu (kap. 4.4.2). Poslední skupinou bylo dlouhodobé měření elektrických parametrů betonových prvků. Při dlouhodobém měření byla zkoumána závislost elektrické odezvy betonového konstrukčního prvku na okolní teplotě a relativní vzdušné vlhkosti (kap. 4.4.3). Ze všech provedených měření bylo nashromážděno velké množství dat. Vzhledem k povaze a rozsahu této práce byly vybrány ty nejzajímavější výsledky, které jsou v textu okomentovány.

4.4.1 Statická měření elektrických parametrů

Koncentrace vodivých příměsí u materiálu, který má mít dobrou citlivost na mechanické namáhání, se musí pohybovat těsně pod perkolačním prahem (viz kap. 2.2). Ze závislosti uvedené na obr. 2 je patrné, že v této oblasti je vodivost materiálu výrazně ovlivněna i velmi malou změnou koncentrace vodivých příměsí. Vzhledem ke způsobu přípravy kompozitní směsi pro výrobu senzorů je výsledná velikost reálné složky impedance silně závislá na mnoha faktorech. V případě vzorků vyrobených z jedné dávky směsi se výsledná hodnota reálné složky

po vytvrzení a vyzrání materiálu senzoru liší až o 50 %. V případě porovnání hodnot vzorků z různých výrobních dávek jsou odchylky hodnot výrazně vyšší. Měření probíhalo pomocí RLC měřicí stanice Agilent E4980A. Velikost budícího signálu byla nastavena na 1 V_{P-P} při frekvenci 1 kHz. Na základě měření statických elektrických parametrů byly vytvořeny skupiny senzorů s velmi podobnými hodnotami reálné složky impedance. Pro integraci do betonového prvku byly použity senzory podobných elektrických vlastností.

4.4.2 Dynamická měření elektrických parametrů

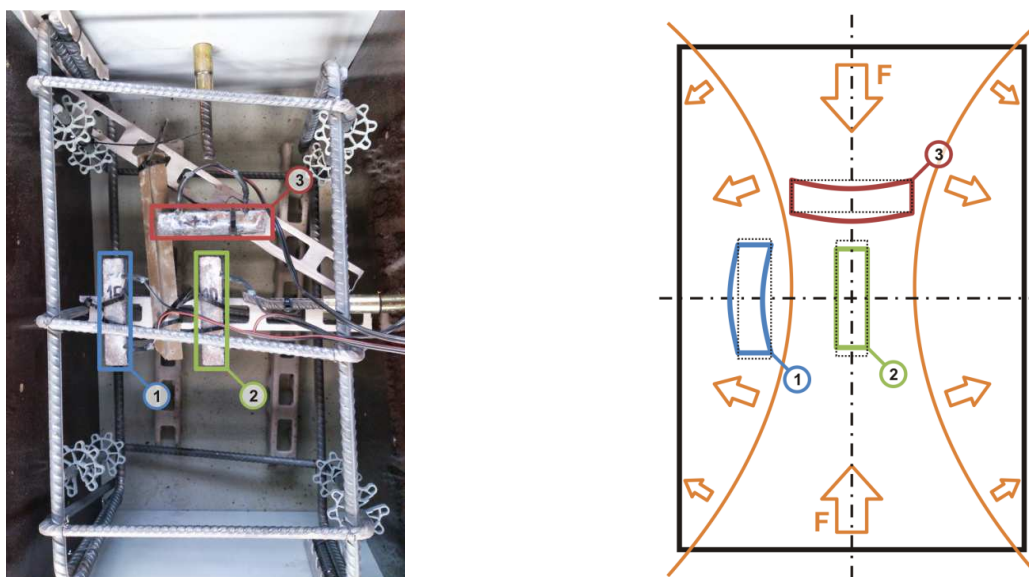
Dynamická měření betonových konstrukčních prvků s integrovanými senzory byla prováděna ve státním podniku TZÚS v Brně. Strojní a technologické vybavení podniku umožňuje provádět certifikované zkoušky různých stavebních a konstrukčních prvků. Pro měření odezvy senzorů integrovaných do konstrukčních prvků byla klíčová možnost řízeného zatěžování pomocí hydraulicky poháněného lisu. Pracoviště, na kterém probíhalo měření elektrických parametrů senzorů integrovaných v pilíři při jeho dynamickém namáhání, je uvedeno na obr. 5.



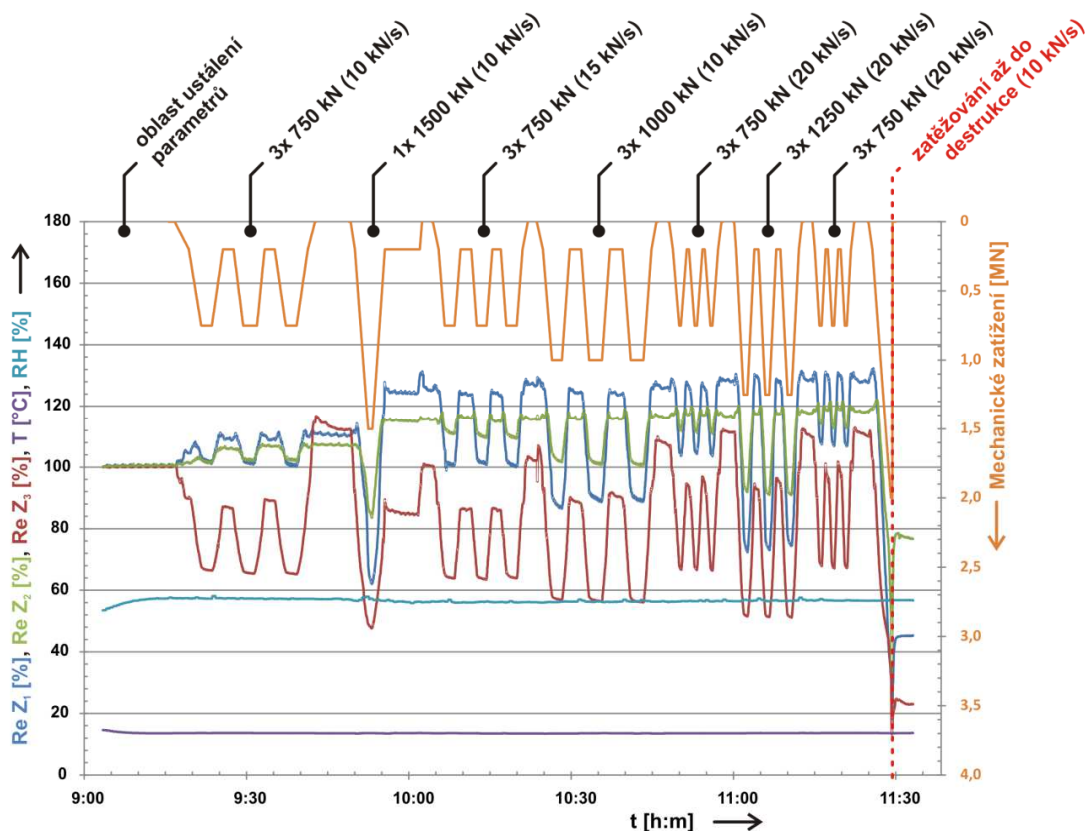
Obr. 5 Pracoviště pro měření elektrických parametrů v průběhu dynamického namáhání betonového pilíře s integrovanými senzory

Zvolená metodika měření spočívala v cyklickém zatěžování a odlehčování betonového pilíře s postupně rostoucím maximálním zatížením a gradientem. Na obr. 6 – vlevo je uvedeno mechanické uspořádání senzorů v objemu materiálu. Senzor číslo 2 (zelená barva) je umístěn vertikálně v geometrickém středu prvku. Nad ním je umístěn senzor číslo 3 (červená barva) s horizontální orientací. Posunutí středu senzoru od geometrického středu prvku je 10 cm. Senzor číslo 1 (modrá barva) je umístěn ve stejné rovině jako senzory číslo 2 a 3 a současně je posunut o vzdálenost 10 cm směrem ke stěně pilíře. V pravé části obr. 6 je uvedeno předpokládané působení sil a jejich vliv na deformaci jednotlivých senzorů. Předpoklad vychází z tvaru prasklin ve struktuře při porušení strukturální integrity

a ze známého vektoru působení deformační síly. Senzor číslo 2 by měl být namáhán zejména ve směru své podélné osy, kdy vlivem působení síly dochází k jeho smršťování (deformace tlakem). Namáhání senzorů 1 a 3 je způsobeno komplexním působením množiny vektorů síly, jejichž rozložení je ovlivněno přítomností drátěné výztuže. Sensory jsou pravděpodobně deformovány zejména ohybem, za přítomnosti působení deformace tlakem ve směru vektoru síly generované lisem.



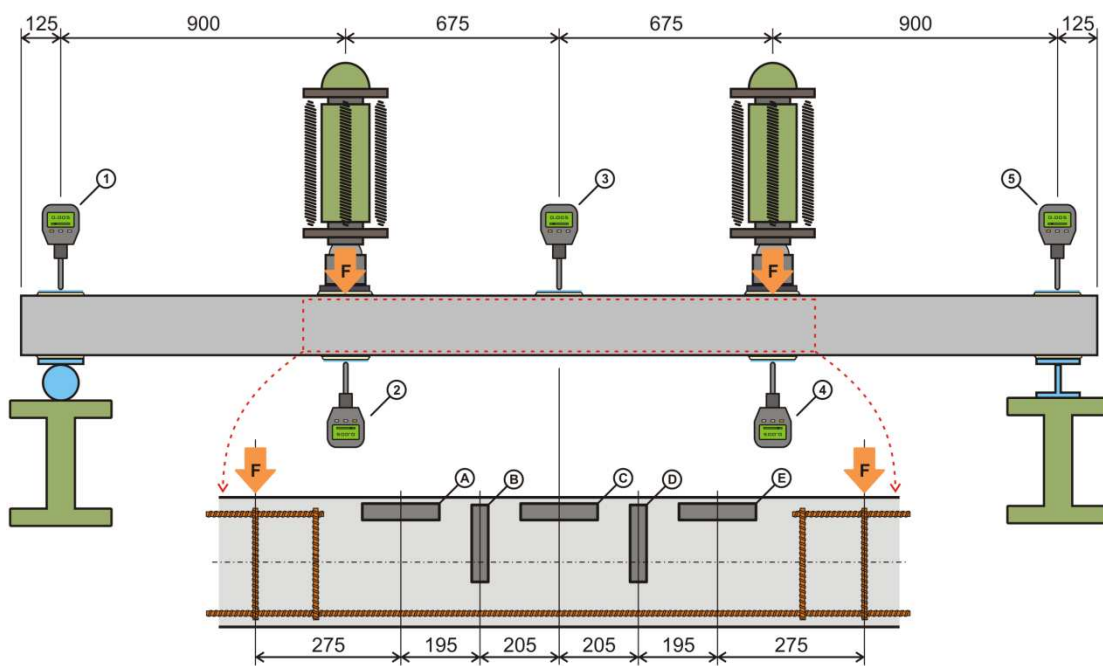
Obr. 6 Geometrické uspořádání senzorů v objemu materiálu pilíře (vlevo) a předpokládané působení sil během zatěžování (vpravo)



Obr. 7 Odezva senzorů integrovaných v betonovém pilíři na cycklické namáhání

Naměřené odezvy senzorů v průběhu cyklického namáhání (obr. 7) potvrdily původní předpoklady o působení sil. Sensor umístěný v *geometrickém středu, orientovaný vertikálně*, má relativně malou citlivost na namáhání prvku, výstupní signál však na změny zatížení reaguje přesně a poloha klidové úrovně je stabilní. Sensor umístěný v *příčné ose, posunutý mimo geometrický střed, orientovaný vertikálně*, má velmi dobrou citlivost na namáhání prvku, výstupní signál na změny zatížení reaguje přesně a poloha klidové úrovně je stabilní. Sensor umístěný v *podélné ose, posunutý mimo geometrický střed, orientovaný horizontálně*, má ze všech výše uvedených možností nejlepší citlivost na namáhání prvku, výstupní signál reaguje přesně, ale poloha klidové úrovně není příliš stabilní.

Pracoviště, na kterém bylo prováděno měření nosníků, je uvedeno na obr. 8. Přístroj pro zatěžování nosníků je kombinací portálového jeřábu a hydraulického lisu. Oba písty byly napojeny na stejný hydraulický okruh. To zajišťovalo rovnoměrné rozložení síly působící na nosník.

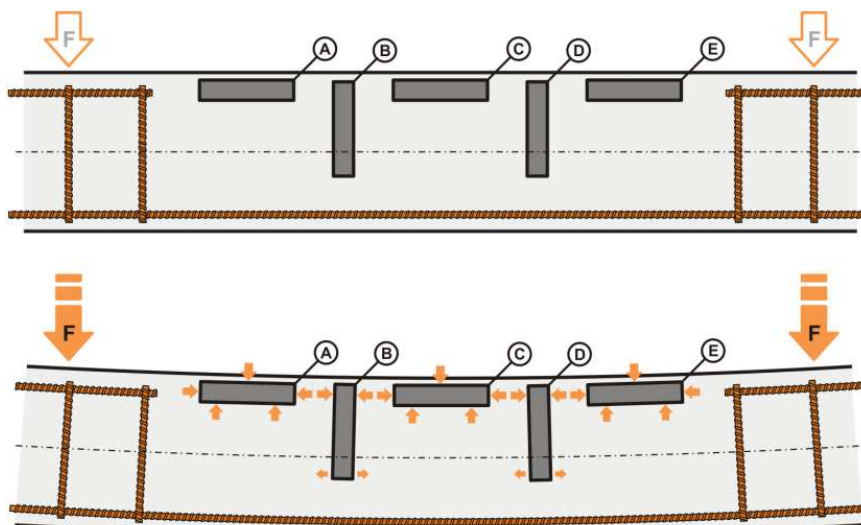


Obr. 8 Schematické znázornění uložení senzorů v objemu materiálu nosníku

Všechny senzory byly v nosníku umístěny v jeho podélné ose (při pohledu shora). Senzory označené A, C a E byly orientovány horizontálně, těsně pod povrchem horní části nosníku. Senzory B a D byly orientovány vertikálně a umístěny mezi senzory A, C a E. Drátěná výztuž je v blízkosti senzorů aplikována pouze ze spodní strany nosníku. Horní výztuž a svislé výztuhy byly v tomto místě vynechány, s cílem koncentrovat působení sil v centrálním prostoru vyplněném senzory.

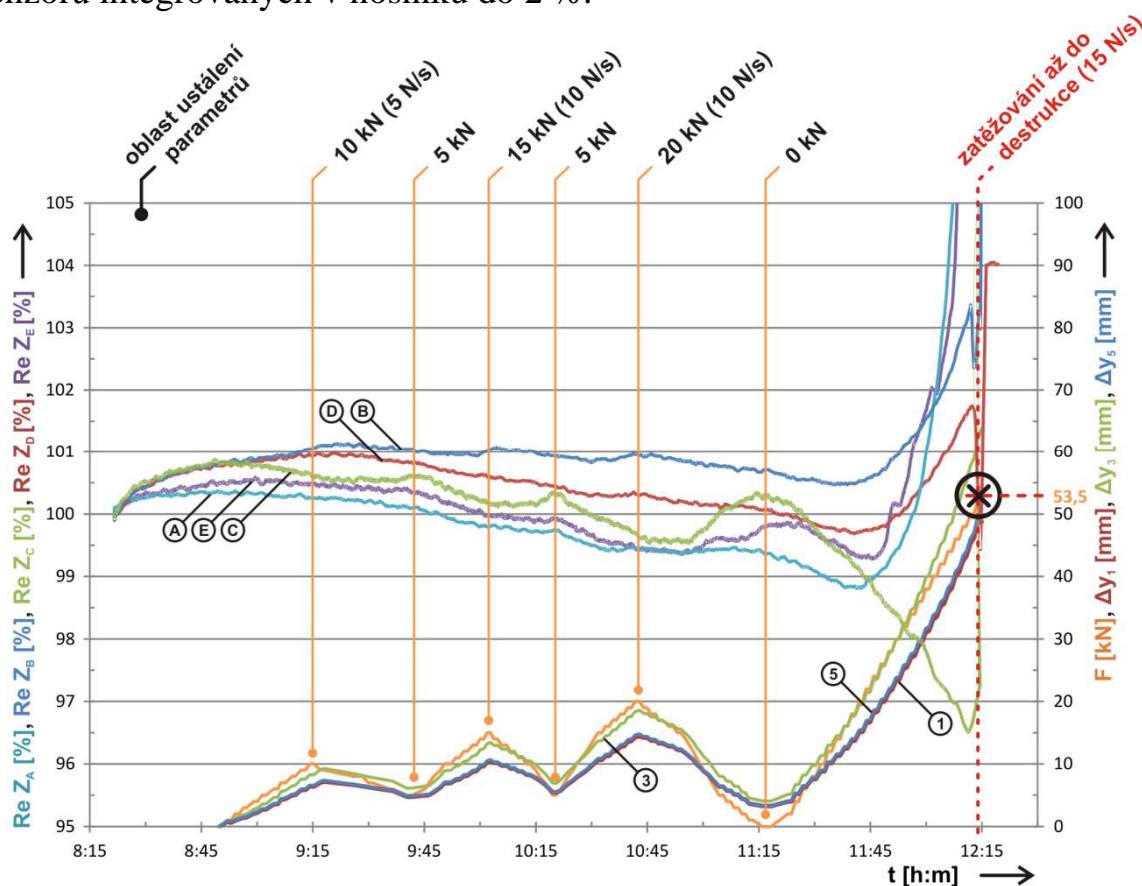
Ohýbání struktury by mělo dle předpokladu generovat sílu, která senzory A, C a E smršťuje v jejich podélné ose a zároveň způsobuje jejich prohýbání (působení sil je v obr. 9 naznačeno oranžovými šipkami). Velikost prohnutí senzorů a jejich smrštění v podélné ose by mělo být úměrné prohnutí nosníku. Senzory B a D by

měly být ve své horní části smršťovány v příčné ose. V dolní části by naopak měly být mírně roztahovány. Míra roztahení by měla být úměrná prodloužení drátěné výztuže v dolní části struktury.



Obr. 9 Předpokládané rozložení sil během zatěžování nosníku

Elektrická odezva senzorů na cyklické zatěžování je relativně malá (obr. 10). Oproti předchozímu měření senzorů integrovaných v pilíři, kde změna relativní velikosti reálné části impedance dosahovala hodnoty až 50 %, je změna hodnoty u senzorů integrovaných v nosníku do 2 %.



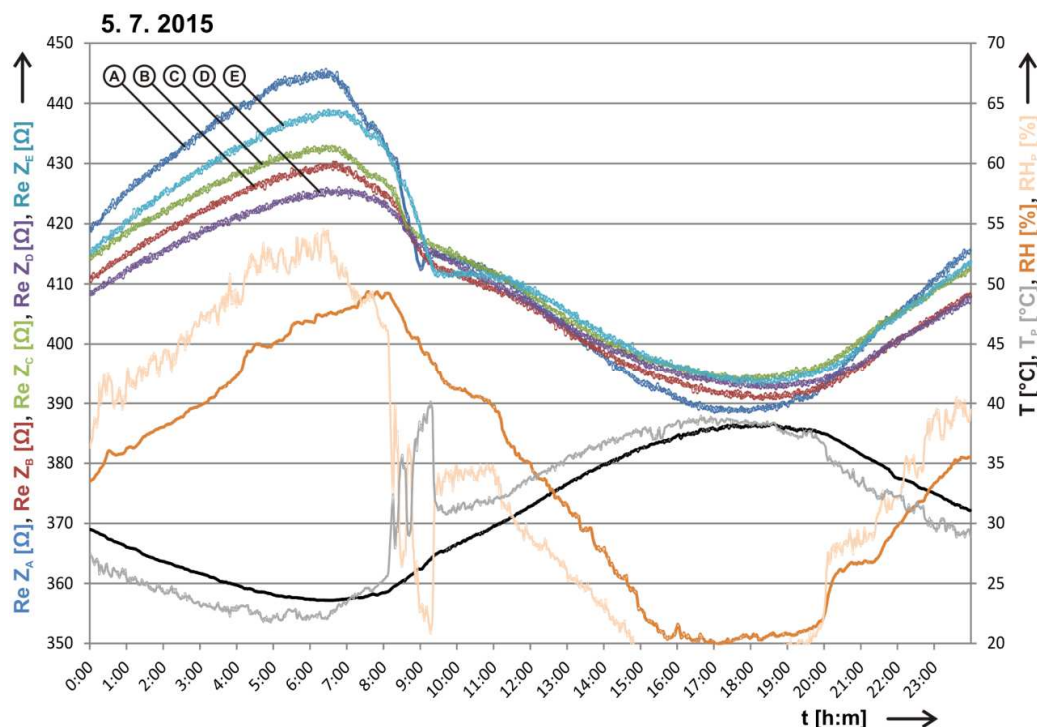
Obr. 10 Odezva senzorů integrovaných v betonovém nosníku na cyklické namáhání

Největší odezvu vykazuje senzor C, který je v objemu materiálu smršťován v podélné ose a zároveň prohýbán (zelený průběh). Nachází se v geometrickém středu a lze předpokládat, že úroveň jeho přetvoření je ze všech senzorů nejvyšší. Sensory A a E, orientované stejným způsobem, které jsou od geometrického středu vzdáleny 40 cm, vykazují nižší citlivost než senzor C. Odezva senzoru A je v grafu zaznamenána průběhem tyrkysové barvy, odezva senzoru E průběhem fialovým. Odezva senzoru E je o něco větší než odezva senzoru A. Jev si lze vysvětlit větším přetvářením materiálu v prostoru, kde byl umístěn senzor E. Tuto hypotézu potvrzuje způsob, jakým došlo k porušení nosníku při překročení limitního průhybu. K porušení strukturální integrity nosníku došlo při hodnotě zatěžovací síly 53,5 kN. Těsně před porušením byl již nosník v příčné ose prohnut o více než 60 mm. Porušení bylo lokální, na horní straně nosníku, v blízkosti místa působení pravého hydraulického pístu. Jednalo se o místo bez horní a příčné výztuže, v místě integrovaného senzoru E. Způsob porušení poukazuje na důležitost podélné výztuže v dolní části nosníku, která má na celkovou pevnost nosníku obrovský vliv. Jedním z ukazatelů, které potvrzují toto tvrzení, jsou trhliny, které postupně vznikaly od dolní hrany nosníku. Přestože trhliny začaly vznikat již při první zatěžovací periodě a s dalšími periodami docházelo k jejich zvětšování, tak ani jedna z nich nezpůsobila kolaps strukturální integrity nosníku. Trhliny byly jenom tak velké, jak jim dovolilo poměrné prodloužení spodní ocelové výztuže během prohýbání. Naměřená odezva poukázala na zajímavý fakt, který se váže k problematice popisované v kap. 2.3 a kap. 4.2. Vzorky senzorů integrované do nosníku byly vyrobeny z jiné materiálové dávky než senzory integrované do pilíře. Složení směsi bylo v obou případech stejné, ale byl mírně pozměněn postup mísení. Po odlití směsi do forem byly vzorky senzorů určené pro zalití do nosníku vibrovány delší dobu. Takto vyrobené senzory byly méně porézní, vzhledově dokonalejší a pevnější. Mírná změna výrobního postupu, jejímž cílem bylo vyrobit senzory s lepšími mechanickými vlastnostmi, však očividně vedla k výraznému zhoršení schopnosti senzorů reagovat na zatížení prostřednictvím změny reálné složky impedance (snížení citlivosti na zatížení).

4.4.3 Dlouhodobá měření elektrických parametrů

Dlouhodobé měření bylo prováděno za účelem zjistit vliv okolního prostředí na elektrické parametry senzorů integrovaných v nosníku. Nosník byl umístěn ve venkovním prostředí, pod střechou výrobní haly VUSTAH tak, aby na něj působily změny okolní teploty a vzdušné vlhkosti. Střecha haly a okolní budovy zajišťovaly, aby na nosník nepršelo a také aby měření nebylo ovlivněno přímým slunečním svitem. Měření probíhalo v letním období, v průběhu měsíce července, kdy denní teploty ve stínu dosahovaly téměř 40°C a noční teploty neklesaly pod 20°C. Měření bylo možné realizovat díky monitorovacímu systému, který byl vyvinut v rámci řešení dizertační práce a je detailně popsán v kap. 6. Jednotlivé bezdrátové měřicí body byly k nosníku připevněny pomocí plastových stahovacích pásek. Komunikační ústředna monitorovacího systému byla umístěna v blízkosti

nosníku. K přenosu naměřených dat do aplikace „Selfmonitoring Control Platform“ byla použita síť GSM, technologie GPRS a komunikační protokol TCP/IP.



Obr. 11 Odezva senzorů integrovaných v objemu pilíře na změnu teploty a relativní vlhkosti v průběhu jednoho letního dne

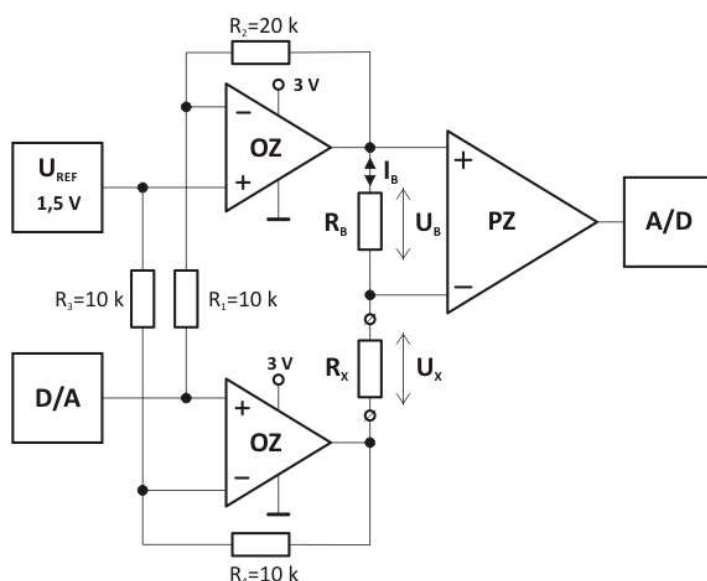
Naměřená odezva senzorů v podobě změny reálné složky impedance v závislosti na okolní teplotě a relativní vlhkosti v průběhu jednoho dne je uvedena na obr. 11. Označení jednotlivých senzorů písmeny odpovídá nákresu na obr. 9. Průběhy jsou doplněny záznamem teploty a relativní vlhkosti získaných z měřicí sondy. Jedna sonda byla umístěna v mezeře mezi měřicím bodem a povrchem pilíře, s cílem snímat průběh veličin v objemu materiálu (v grafu $T [^{\circ}C]$, $RH [\%]$). Druhá sonda byla umístěna volně v prostoru, s cílem snímat podmínky v okolí nosníku (v grafu $T_p [^{\circ}C]$, $RH_p [\%]$). Při vzájemném porovnání veličin měřených v objemu materiálu a v okolí nosníku je velmi dobře patrný vliv setrvačnosti. Ta je v případě teploty způsobena tepelnou kapacitou a v případě vlhkosti schopností betonu přebírat vlhkost prostředí. U průběhů měřených sondou umístěnou volně v prostředí jsou patrné prudší výkyvy, způsobené prouděním vzduchu kolem snímače. Extrémní výkyvy okolní teploty a vlhkosti v čase od 8 h do 9:30 h jsou způsobeny ranním sluncem, které díky své nízké poloze v tomto časovém intervalu prosvítalo mezerou mezi budovami přímo na nosník (i přes snahu tomu zabránit). Tento jev byl objasněn díky vlastnostem monitorovacího systému, který umožňuje vzdáleně sledovat měřená data v reálném čase. Z naměřených závislostí reálné složky impedance je patrná silná závislost na vlhkosti. Velký vliv má i prostorové uspořádání senzorů v objemu materiálu. Sensory A, C a E byly umístěny v horní části nosníku (horizontálně), těsně pod povrchem. Výkyv okolní teploty a vlhkosti, způsobený osvětlením nosníku, se nejvíce projevil právě na těchto senzorech. Křivky

získané ze senzorů B a D, které jsou umístěny vertikálně, hlouběji v objemu materiálu, tyto extrémy nevykazují a to díky setrvačnosti okolního materiálu, která zabraňuje prudkým změnám. Závislost elektrických vlastností na okolních klimatických podmínkách představuje problém, který je třeba před praktickým využitím senzoru odstranit. Nabízí se možnost numerické kompenzace s použitím informací o aktuální teplotě a vlhkosti. Koncept monitorovacího systému s touto variantou počítá. Závislost elektrických parametrů senzoru na teplotě a vlhkosti musí být charakterizována prostřednictvím měření v klimatické komoře. Vliv změny teploty je třeba oddělit od vlivu změny vlhkosti a naopak. K tomu je nutné provést další měření v klimatické komoře s programově řízenou teplotou a vlhkostí. Kompenzace vlivu klimatických podmínek na elektrické vlastnosti je možným pokračováním všech kroků popsaných v kapitole 4 a představuje výzvu pro budoucí práci na vývoji senzoru.

5 LABORATORNÍ MĚŘICÍ APARATURA

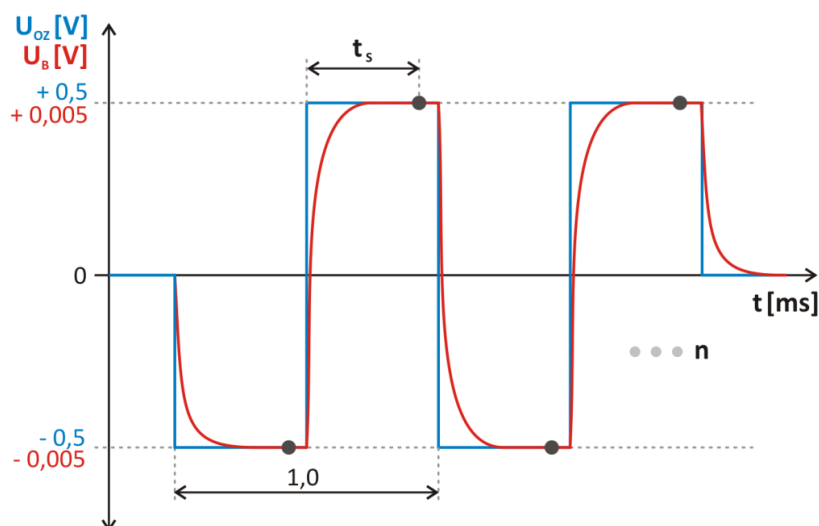
U nově připravených vzorků materiálu docházelo při jejich mechanickém namáhání k významné změně reálné složky impedance. Bylo třeba najít novou měřicí metodu, která by umožnila měřit reálnou složku impedance, a její vlastnosti ověřit v praxi.

V případě kompozitního betonu není možné pro měření odporu využít stejnosměrné napětí. Působením stejnosměrného napětí v silně alkalickém prostředí betonu by docházelo k elektrochemické korozi elektrodového systému (viz kap 4.1). Měřicí metoda byla upravena tak, aby bylo možné měřený odpor budit střídavým napětím. Pro aplikaci měřicího principu ve smíšeném, analogově-digitálním systému je nejjednodušší variantou generování obdélníkového průběhu. Horní z dvojice operačních zesilovačů je zapojen jako invertující, dolní jako neinvertující (obr. 12). Kvůli zachování symetrie výstupního signálu musí mít oba zesilovače stejné zesílení.



Obr. 12 Princip měření reálné složky impedance pomocí střídavého buzení zátěže

Komplementární dvojice zesilovačů je napájena napětím o velikosti 3 V. Zdroj referenčního napětí o velikosti 1,5 V slouží k vytvoření tzv. „virtuální země“ pro oba operační zesilovače. Cílem je vytvořit stejnosměrné posunutí výstupního napětí zesilovačů o 1,5 V tak, aby nebylo nutné pro obousměrné buzení zátěže napájet operační zesilovače zdrojem symetrického napětí. Výstupní napětí z převodníku D/A rozvažuje komplementární dvojici obdélníkovým signálem o frekvenci 1 kHz (obr. 13 – modrý průběh). Generování obdélníkového průběhu je zajištěno časově synchronizovaným střídáním tří hodnot výstupního napětí.

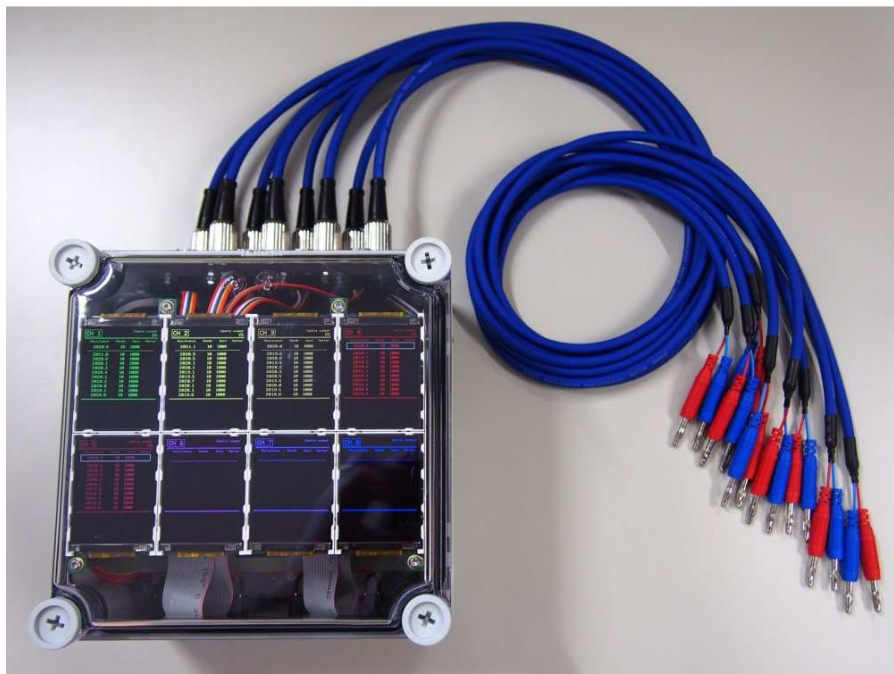


Obr. 13 Budicí signál (U_{OZ}) a reakce měřeného prvku snímaná na bočníku (U_B)

Počáteční a konečná hodnota odpovídá klidovému stavu, ve kterém je komplementární dvojice vyvážená a zátěží neprotéká téměř žádný proud. Na začátku měřicí periody je nejprve nastavena výstupní hodnota napětí převodníku D/A, která odpovídá klidovému stavu. Teprve poté jsou aktivovány výstupy operačních zesilovačů. Po uplynutí krátké prodlevy, která slouží k ustálení provozních parametrů operačních zesilovačů, je generován určitý počet měřicích impulzů (n) pomocí střídání dvou hodnot výstupního napětí převodníku D/A. Jejich velikost je nastavena tak, aby byl výsledný obdélníkový signál symetrický, s rozkmitem 1 V_{p-p} . Po skončení posledního impulzu jsou výstupy operačních zesilovačů opět deaktivovány. Kvůli potlačení možné koroze elektrodového systému vlivem polarizace má budicí signál stejný počet kladných a záporných kmitů.

Typická odezva měřeného prvku na budicí signál je zobrazena na obr. 13 pomocí červeného průběhu. Při změně polarizace dochází k postupnému nabíjení a vybíjení kapacity materiálu, které se do průběhu promítá zaoblením náběžné či sestupné hrany signálu. Vzorkování výstupu přístrojového zesilovače pomocí převodníku A/D probíhá až po ustálení přechodového děje, těsně před další změnou polarity (naznačeno šedými body). Doba t_s označuje zpoždění vzorkování od změny polarity budicího signálu a je jedním z parametrů měření, který může být programově nastaven. Dalším parametrem je počet budicích impulzů n (v obr. 13 $n = 2$).

Při vývoji laboratorní měřicí aparatury byly zohledněny všechny předchozí poznatky. Přístroj umožňuje měření pomocí dvou implementovaných metod, a to buď na osmi samostatných, galvanicky oddělených kanálech, nebo lze využít čtyři kanály pro můstkové zapojení. Při návrhu byl kladen důraz na robustnost měřicí konstrukce, aby odpovídala průmyslovému použití přístroje (obr. 14).

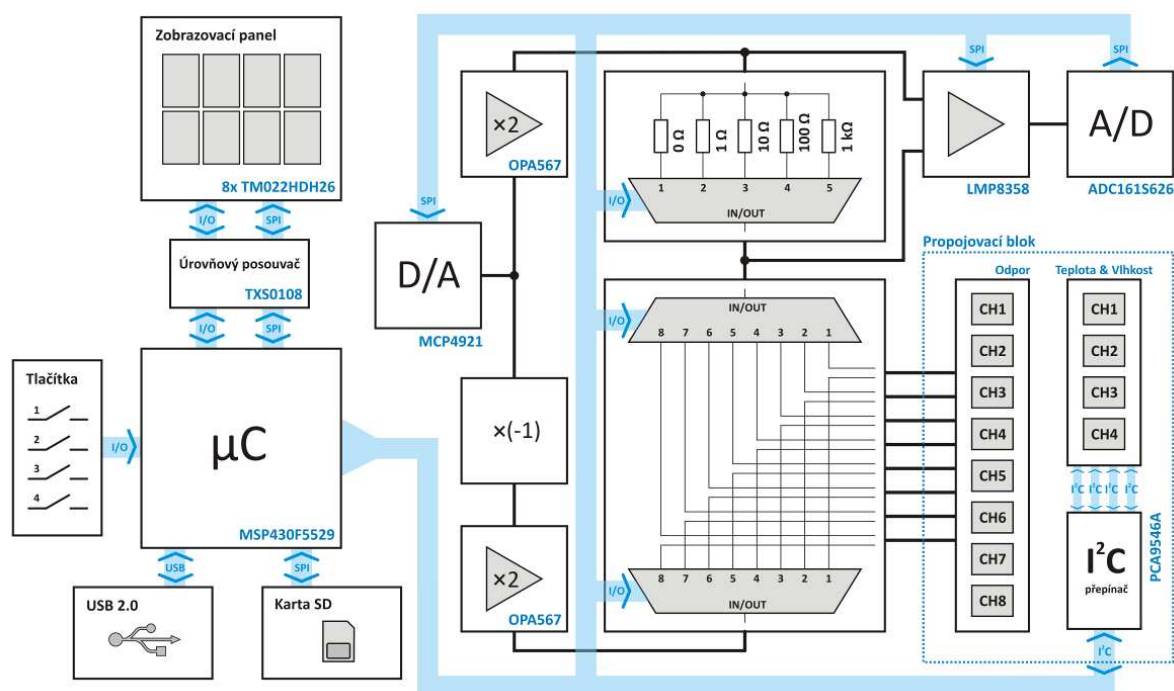


Obr. 14 Laboratorní měřicí aparatura

Blokové schéma přístroje je znázorněno na obr. 15. Princip měření spočívá v generování obdélníkového signálu pomocí převodníku D/A, který je přiveden na dvojici výkonových operačních zesilovačů OPA567. Zesilovače jsou zapojeny tak, aby byla připojená zátěž buzena v protifázi signálem o frekvenci 1 kHz a velikosti amplitudy 1 V (špička-špička). Budicí signál prochází přes digitálně řízený bočník, který umožňuje volbu jednoho z pěti měřicích rozsahů. Dále vstupuje do digitálně řízeného přepínače kanálů, který umožňuje měřicí řetězec připojovat k jednotlivým kanálům dle aktuálního měřicího režimu. Úbytek napětí na odporovém bočníku je snímán pomocí diferenciálního vstupu přístrojového operačního zesilovače LMP8358. Vestavěný algoritmus automatické volby měřicího rozsahu využívá možnosti měnit zesílení pomocí programu. V současné fázi vývoje je nastaven tak, aby pro každý měřený vzorek našel optimální zisk zesilovače, který umožní maximální citlivost na změnu měřeného odporu. Výstup přístrojového zesilovače je vzorkován pomocí šestnáctibitového převodníku A/D.

Jedním z požadavků na konstrukci laboratorní aparatury byla možnost měřit doplňkové veličiny v podobě teploty a relativní vlhkosti. Pro charakterizaci kompozitních materiálů jsou zajímavé jak okolní klimatické podmínky, tak i podmínky uvnitř měřeného materiálu. Bylo tedy třeba najít takové senzory, které budou dostatečně přesné a zároveň svými rozměry umožní snadnou integraci do objemu měřeného materiálu. Byly zvoleny senzory SHT21, které integrují

v jednom miniaturním pouzdře snímač teploty, vlhkosti, obvody analogového přizpůsobení, obvody digitálního vyhodnocení, kalibrace a sériové komunikační rozhraní I²C. Rozlišení teploty může být nastaveno na 12 bitů nebo 14 bitů. Při dvanáctibitovém rozlišení odpovídá nejméně významný bit (LSB) hodnotě 0,04 °C, při čtrnáctibitovém rozlišení hodnotě 0,01 °C. Absolutní přesnost měření teploty je v rozmezí běžných kladných teplot typicky $\pm 0,3$ °C. Rozlišení relativní vlhkosti může být nastaveno na 8 bitů nebo 12 bitů. Při osmibitovém rozlišení odpovídá nejméně významný bit hodnotě 0,7 %, při dvanáctibitovém rozlišení hodnotě 0,04 %. Absolutní přesnost měření relativní vlhkosti je při teplotě 25 °C typicky ± 2 %, maximálně ± 3 % v rozmezí relativní vlhkosti 20 % až 80 %.



Obr. 15 Blokové schéma laboratorní měřicí aparatury

Řídicí program mikrokontroléru MSP430F5529 zajišťuje všechny funkce spojené s provozem laboratorní měřicí aparatury. Na zobrazovacím panelu, složeném z osmi displejů TFT, jsou vykreslovány hodnoty aktuálně změřených veličin a v případě velikosti reálné složky impedance i historie několika předešlých hodnot. Každý displej zobrazuje informace vztažené k jednomu z osmi měřicích kanálů, které jsou odlišeny barvou grafiky. Zbývající plocha je využita pro zobrazení doplňkových informací v podobě teploty a relativní vlhkosti z připojených sond, aktuálního data, času, názvu souboru na kartě SD apod.

6 MONITOROVACÍ SYSTÉM

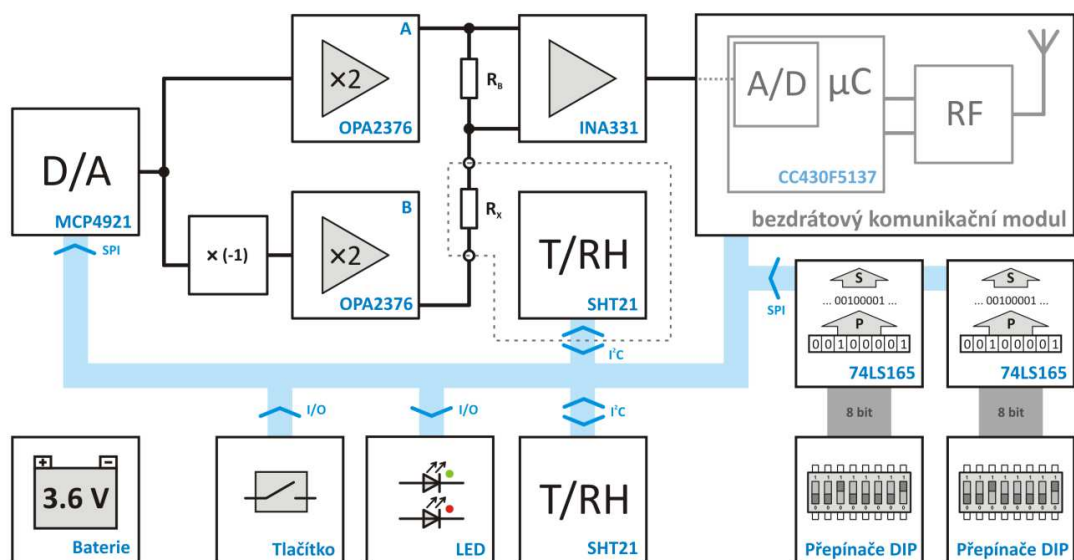
V kapitole 5 byl popsán vývoj aparatury vhodné pro laboratorní měření kompozitních vzorků. Dalším krokem bylo navrhnout a zrealizovat ucelené řešení, které umožní praktické použití funkčního kompozitního materiálu. Vznikla

myšlenka monitorovacího systému, který by umožnil dlouhodobý dohled nad stavebními konstrukcemi z betonu.

Topologii monitorovacího systému lze zobecnit do tří úrovní. První úroveň se sestává z množiny měřicích bodů, které jsou umístěny v těsné blízkosti sledovaného objektu. Každý měřicí bod je napojen na elektrodový systém měřicího elementu, který je integrován v betonové konstrukci. Zajišťuje periodické měření elektrických parametrů a doplňkových informací v podobě teploty a relativní vlhkosti. Naměřená data odesílá pomocí vestavěného bezdrátového rozhraní do komunikační ústředny, která je druhou úrovní systému. Komunikační ústředna sbírá informace od jednotlivých měřicích bodů, skládá je do komunikačních rámců (paketů) a odesílá prostřednictvím bezdrátové komunikační technologie GSM (*Global System for Mobile Communications*) do sítě Internet. Využívá při tom službu pro datové přenosy GPRS (*General Packet Radio Service*). Při této komunikaci je využit primární přenosový protokol sítě Internet TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Ten zajišťuje bezpečný přenos informací do třetí úrovně systému, která je tvořena serverem. Server byl integrován do uživatelské aplikace „*Selfmonitoring Control Platform*“, která umožňuje sběr naměřených dat vysílaných ústřednou, jejich archivaci a vizualizaci v podobě grafů sledovaných veličin. Topologie monitorovacího systému využívá hierarchické uspořádání, které umožňuje bezpečný dlouhodobý provoz. Při výpadku jednoho či více měřicích bodů není ohrožena funkcionality celého systému. Komunikační ústředna je vybavena možností napájení pomocí záložního zdroje, který udrží systém v činnosti i v případě výpadku elektrické rozvodné sítě. Při návrhu systému byla zohledněna výrobní cena, která hraje důležitou roli v případě komerčního využití.

6.1 MĚŘICÍ BOD

Měřicí bod je první, nejnižší úrovní monitorovacího systému. Jeho úkolem je periodicky měřit velikost reálné složky impedance sledovaného prvku, aktuální teplotu a relativní vlhkost. Naměřená data jsou na konci každé měřicí periody odeslána do komunikační ústředny. Blokové schéma měřicího bodu je uvedeno na obr. 16. Činnost měřicího bodu je založena na využití nové měřicí metody. Aktivitu lze rozdělit do dvou režimů, které se střídají během nastavené periody měření – aktivní a úsporný režim. Cílem je minimalizovat spotřebu elektrické energie. V časovém úseku, kdy není požadována žádná činnost, pracuje měřicí bod v úsporném režimu. Napájecí napětí je přivedeno pouze do mikrokontroléru bezdrátového komunikačního modulu, který pracuje v režimu se sníženou spotřebou. V tomto režimu jsou vypnuty všechny vnitřní periferie až na časovač, který autonomně odměřuje dobu do přerušení a následného uvedení do aktivního módu. Proudová spotřeba mikrokontroléru v úsporném režimu se pohybuje v závislosti na velikosti napájecího napětí a okolní teplotě od 2 μA do 4 μA . Měřicí bod byl vybaven jedním interním a jedním externím čidlem teploty a relativní vlhkosti SHT21.

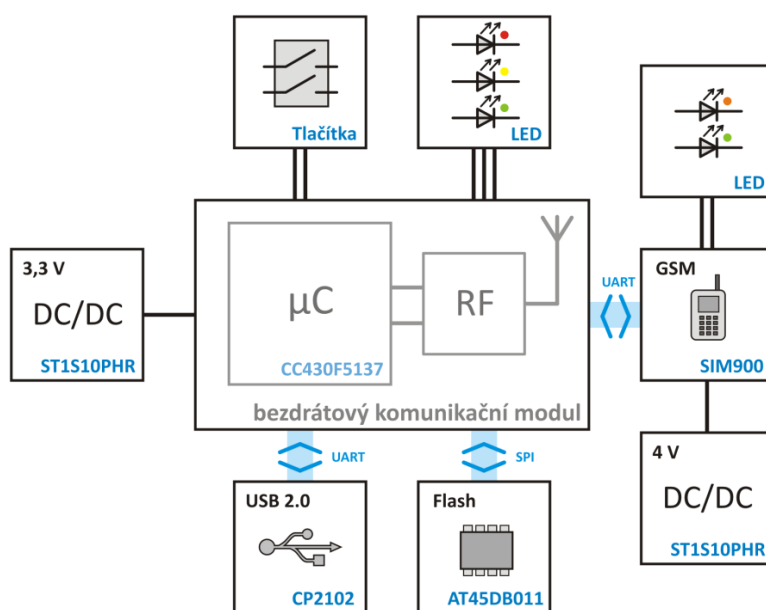


Obr. 16 Blokové schéma měřicího bodu

Naměřená velikost proudové spotřeby v režimu spánku měřicího bodu je $5,7 \mu\text{A}$. V aktivním režimu je průměrná velikost proudové spotřeby 33 mA po dobu 95 ms (probuzení mikrokontroléru, změření velikosti reálné složky impedance, vyčtení informací ze senzorů SHT21, odeslání datových rámců, čekání na potvrzení ústřednou, návrat do režimu spánku). Při periodě měření 1 minuta je kapacita spotřebovaná z napájecího článku $58 \mu\text{A/h}$. Při ideální kapacitě článku 19 A/h by mohl bezdrátový měřicí bod pracovat nepřetržitě 37 let. Vzhledem k omezené životnosti článku (výrobce garantuje 10 let) bude tato doba kratší.

6.2 KOMUNIKAČNÍ ÚSTŘEDNA

Komunikační ústředna je druhou úrovní v hierarchii monitorovacího systému. Její funkčnost je pro monitorovací systém klíčová.

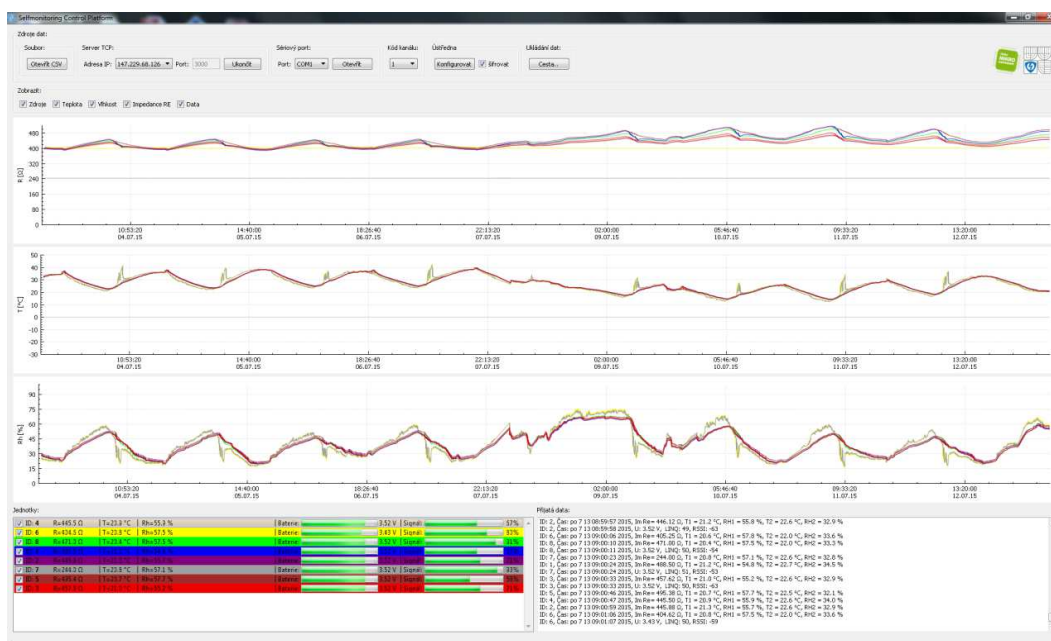


Obr. 17 Blokové schéma komunikační ústředny

Funkce ústředny může být zálohována pomocí přídavného akumulátoru, který zajistí nepřetržitý provoz i v případě výpadku elektrické rozvodné sítě. Blokové schéma je uvedeno na obr.17. Hlavním řídicím prvkem je mikrokontrolér CC430F5137 integrovaný v bezdrátovém komunikačním modulu. Obslužný program mikrokontroléru ovládá připojené periferie, sbírá data od jednotlivých měřicích bodů a zpracované rámce předává do třetí úrovně monitorovacího systému, kterou je server integrovaný v aplikaci „Selfmonitoring Control Platform“. Konektivita do sítě Internet je zajištěna pomocí bezdrátové technologie GSM.

6.3 APLIKACE PRO PC

Aplikace „Selfmonitoring Control Platform“ integrující vícevláknový server, je třetí a zároveň nejvyšší úrovní v hierarchii monitorovacího systému. Data odesílaná komunikační ústřednou do sítě Internet, anebo po sériovém komunikačním rozhraní USB, jsou sbírána serverem a v reálném čase zobrazována v uživatelsky přívětivém aplikačním prostředí GUI (*Graphical User Interface*).



Obr. 18 Okno aplikace „Selfmonitoring Control Platform“

Hlavní panel se nachází ve střední části okna aplikace (obr.18). Slouží k vizualizaci načítaných dat formou grafů. Hodnoty jednotlivých veličin jsou vyneseny v časové závislosti. Ke vzájemné synchronizaci je využit čas operačního systému. Každý vzorek, který server řijme, je opatřen časovou značkou, která určuje jeho pozici na ose X. Hodnota na ose Y je dána velikostí sledované veličiny. Nezávisle na zdroji jsou všechna příchozí data zálohována na pevný disk počítače ve formátu *.csv.

ZÁVĚR

V dizertační práci byla rozpracována problematika využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s cementovou matricí. Práce byla řešena v úzké návaznosti na projekt „Multifunkční kompozity mimořádných vlastností na bázi anorganických nanosložek (KOMPOZITY)“, jehož výstupem byla původní patentovaná receptura přípravy kompozitní směsi s tenzometrickými vlastnostmi, a na projekt „Sledování stavu stavebních konstrukcí pomocí elektricky vodivých prvků s modifikovanou cementovou matricí“, během jehož řešení byla původní receptura optimalizována pro zvýšení citlivosti reálné složky impedance na poměrné přetvoření objemu materiálu. Vzhledem k rozsáhlosti tematiky a její interdisciplinární povaze byly projekty řešeny ve spolupráci s dalšími partnery. Výzkum korozního působení prostředí cementové matrice na vybrané materiály byl proveden ve spolupráci s Ústavem elektrotechnologie VUT v Brně. Zkušenosti pracovníků ústavu s korozí v alkalickém prostředí akumulátorů mi pomohly stanovit správnou metodiku měření. Přípravu kompozitního materiálu a technologickou podporu výroby senzorů zajistil Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s. (VUSTAH). Výrobu betonových prvků s železnou výztuží a integrovanými senzory zrealizovala společnost DAKO, spol. s r. o. Měření odezvy vyrobených betonových prvků – nosníku a pilíře, bylo realizováno v brněnské pobočce Technického a zkušebního ústavu stavebního Praha, s. p., který je certifikovanou zkušebnou pro měření mechanických vlastností a odolnosti betonových stavebních prvků.

Na základě provedené úvodní rešerše, která přispěla k důkladnému poznání současného stavu problematiky v oblasti původních znalostí o kompozitních materiálech s cementovou matricí, včetně výhodných vlastností materiálů s modifikovanou matricí, jsem vybral vědecky nejzajímavější oblast využití materiálu se zvýšenou citlivostí elektrických vlastností na jeho poměrném přetvoření. Za pomoci všech získaných informací jsem sestavil jednotlivé cíle řešení dizertační práce.

V experimentální části práce byl zkoumán vliv působení korozního prostředí betonu a cementové matrice na materiály vhodné ke konstrukci senzoru. Na základě výsledků korozních měření a expozičních testů byla jako vhodný materiál pro realizaci elektrodového systému senzoru vybrána měď. Bylo zjištěno, že použitím organického inhibitoru koroze Slovasol 2520/2 jsou účinky korozního působení prostředí na měď zcela potlačeny. Při sledování účinků korozního působení prostředí betonu na uhlík, který tvoří funkční složku kompozitní směsi, byla na základě provedeného potenciodynamického měření stanovena mez bezpečného potenciálu na 1 V. Sensory byly vyrobeny s použitím známého složení receptury a výrobního postupu kompozitní směsi. Do směsi bylo přidáno aditivum Slovasol 2520/2 a elektrody byly vyrobeny z mědi. Sensory vyrobené ve tvaru kvádrů o rozměrech 100 mm × 20 mm × 20 mm, byly integrovány do betonových nosníků a pilířů. Elektrická odezva integrovaných senzorů byla měřena při cyklickém zatěžování a odlehčování prvků. Na základě prostorového umístění senzorů v objemu betonových prvků jsem stanovil hypotézy o rozložení vnitřních sil a jejich účinkům na

integrované senzory. U obou prvků naměřené průběhy potvrdily původní hypotézy. Pokud jsou senzory namáhány složením většího počtu vektorů působení síly, například stlačením a současným ohybem, vykazuje elektrická odezva vyšší citlivost na úroveň zatížení než u senzorů namáhaných pouze v jednom směru. Relativní změna reálné složky impedance dosahovala u senzorů integrovaných v pilíři hodnoty až 50 %. Senzory vyrobené ze stejné směsi, pouze s upraveným výrobním postupem, které byly integrovány do objemu nosníku, vykazovaly relativní změnu reálné složky impedance pouze do 2 %. Úpravou výrobního postupu s cílem vyrobit senzory s lepší mechanickou odolností a s dokonalejším povrchem došlo k většímu zhutnění kompozitní směsi a výraznému snížení schopnosti materiálu reagovat na poměrné přetvoření. Dlouhodobá měření, prováděná na nezatíženém nosníku ve venkovním prostředí, prokázala časově stálou závislost elektrické odezvy na změnách teploty a relativní vlhkosti.

Při vzájemné spolupráci s partnery VUSTAH a DAKO byl můj přínos ve stanovení metodiky jednotlivých pracovních úkonů a pracovního postupu, zatímco partneři se zabývali časově a materiálově náročnými rutinními činnostmi, spojenými s přípravou kompozitní směsi dle výrobní receptury, formováním a výrobou betonových konstrukčních prvků. S Ústavem elektrotechnologie VUT v Brně byla aktivně konzultována problematika korozního působení a potenciodynamických měření. Časově náročné expoziční a korozní testy, které jsem zpracoval a vyhodnotil, provedli pracovníci Ústavu elektrotechnologie.

Měření elektrické odezvy na dynamické zatěžování bylo umožněno díky konstrukci speciální laboratorní měřicí aparatury, jejímuž vývoji a konstrukci jsem věnoval v průběhu řešení dizertační práce velkou pozornost. Navrhl jsem nový měřicí princip, který jsem aplikoval do laboratorní měřicí aparatury a monitorovacího systému, který jsem v rámci dizertační práce navrhl a zkonstruoval. Monitorovací systém umožňuje praktické využití senzorů v reálné aplikaci.

Závěrem lze konstatovat, že tato práce přinesla nové významné poznatky v oblasti využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou maticí. Byla provedena měření s cílem vybrat vhodné materiály pro konstrukci kompozitního tenzometru, s ohledem na dlouhodobou stabilitu elektrických vlastností a odolnost proti korozi. Unikátnost spočívá především v praktické aplikaci poznatků, vedoucích k vytvoření funkčního kompozitního tenzometru, aplikaci nového měřicího principu do laboratorního měřicího přístroje a vytvoření komplexního monitorovacího systému se sítí bezdrátových měřicích bodů pracujících na novém měřicím principu.

Výše popsanými závěry byly naplněny dizertabilní cíle práce, které jsem si stanovil. Provedené experimenty a měření vedly k výstupům práce, které posouvají původní teoretické znalosti o unikátním materiálu do nové roviny praktického využití a komercializace.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] OLESON, John Peter, Christopher BRANDON, Steven M. CRAMER, Roberto CUCITORE, Emanuele GOTTI a Robert L. HOHLFELDER. The ROMACONS Project: a Contribution to the Historical and Engineering Analysis of Hydraulic Concrete in Roman Maritime Structures. *International Journal of Nautical Archaeology*. 2004, 33(2): 199-229. DOI: 10.1111/j.1095-9270.2004.00020.x. ISSN 1057-2414. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1095-9270.2004.00020.x>.
- [2] ZAITSEV, Vladimir, Veniamin NAZAROV, Vitaly GUSEV a Bernard CASTAGNEDE. Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *NDT*. 2006, 39(3): 184-194. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.07.007. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869505001039>.
- [3] MARTZ, HARRY E., DANIEL J. SCHNEBERK, G. PATRICK ROBERSON a PAULO J.M. MONTEIRO. COMPUTED TOMOGRAPHY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 1992, 8-9(1-6): 1035-1047. DOI: 10.1080/10589759208952773. ISSN 1058-9759. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759208952773>.
- [4] HALLAJI, Milad a Mohammad POUR-GHAZ. A new sensing skin for qualitative damage detection in concrete elements: Rapid difference imaging with electrical resistance tomography. *NDT*. 2014, (68): 13-21. DOI: 10.1016/j.ndteint.2014.07.006. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869514000942>.
- [5] SONG, G, H GU, Y L MO, T T C HSU a H DHONDE. Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers. *Smart Materials and Structures*. 2007, 16(4): 959-968. DOI: 10.1088/0964-1726/16/4/003. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=4/a=003?key=crossref.90cba9f03f27e225fd02d42bacf549a7>.
- [6] DEBORAH D.L. CHUNG. *Composite materials science and applications*. 2. London: Springer, 2010. ISBN 978-184-8828-315.
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] ČSN EN 197-1 (72 2101). *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Dostupné také z: http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/72/90385/90385_nahled.htm.
- [9] CHUNG, D.D.L. Electrical Conduction Behavior of Cement-Matrix Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2002, 11(2): 194-204. DOI: 10.1361/105994902770344268. ISSN 1544-1024. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1361/105994902770344268>.

- [10] CHUNG, D.D.L. Functional Materials: Electrical, Dielectric, Electromagnetic, Optical and Magnetic Applications : (with Companion Solution Manual). 2. Singapore: World Scientific, 2010. ISBN 978-981-4287-15-9. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=sVw0Sc_LehQC.
- [11] CHUNG, D.D.L. Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B: Engineering*. 2000, **31**(6-7): 511-526. DOI: 10.1016/S1359-8368(99)00071-2. ISSN 13598368. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836899000712>.
- [12] CHEN, Bing, Keru WU a Wu YAO. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 2004, **26**(4): 291-297. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00138-5. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946502001385>.
- [13] MCLACHLAN, David S. a Godfrey SAUTI. The AC and DC Conductivity of Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*. 2007, 1: 1-9. DOI: 10.1155/2007/30389. ISSN 1687-4110. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2007/030389/abs/>.
- [14] BRANKOV, Jordan G, Daniel M DANCHEV a Nicholai S TONCHEV. *Theory of critical phenomena in finite-size systems: scaling and quantum effects*. River Edge, NJ: World Scientific, 2000, xvii, 439 p. Series in modern condensed matter physics, 9. ISBN 98-102-3925-4.
- [15] KIRKPATRICK, Scott. Percolation and Conduction. *Reviews of Modern Physics*. 1973, **45**(4): 574-588. DOI: 10.1103/RevModPhys.45.574. ISSN 0034-6861. Dostupné také z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.45.574>.
- [16] EFROS, A. L. a B. I. SHKLOVSKII. Critical Behaviour of Conductivity and Dielectric Constant near the Metal-Non-Metal Transition Threshold. *Physica status solidi (b)*. 1976, **76**(2): 475-485. DOI: 10.1002/pssb.2220760205. ISSN 0370-1972. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pssb.2220760205>.
- [17] WEN, Sihai a D.D.L. CHUNG. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement. *Carbon*. 2006, **44**(11): 2130-2138. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.03.013. ISSN 0008-6223. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622306001540>.
- [18] TIAN, Xin a Hu HU. Test and Study on Electrical Property of Conductive Concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2012, (5): 83-87. DOI: 10.1016/j.proeps.2012.01.014. ISSN 1878-5220. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187852201200015X>.
- [19] CHIARELLO, Manuela a Raffaele ZINNO. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composites*. 2005, **27**(4): 463-469. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.001. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504001374>.

- [20] LI, Hui, Hui-gang XIAO a Jin-ping OU. Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 2006, **28**(9): 824-828. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.004. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946506000874>.
- [21] XIE, Ning, Xianming SHI, Decheng FENG, Boqiang KUANG a Hui LI. Percolation backbone structure analysis in electrically conductive carbon fiber reinforced cement composites. *Composites Part B: Engineering*. 2012, **43**(8): 3270-3275. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.02.032. ISSN 1359-8368. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812001886>.
- [22] PAVEL, Šteffan, Barath PETER, Stehlík Jiří a Radimír VRBA. *Směs na bázi cementu ke zhotovení dílců pro měření odezvy při mechanickém namáhání a dílec z materiálu na bázi cementu*. Česká Republika. 22106 UV 2010-23325. Uděleno 12.10.2010. Zapsáno 21.04.2011. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0022/uv022106.pdf>.
- [23] ŠTEFFAN, Pavel, Peter BARATH, Jiří STEHLÍK a Radimír VRBA. Směs na bázi cementu ke zhotovení dílců pro měření odezvy při mechanickém namáhání, dílec z materiálu na bázi cementu a způsob měření odezvy při mechanickém namáhání. Česká Republika. 303207 P 2010-745. Uděleno 12.04.2012. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/303/303207.pdf>.
- [24] JUNEK, Jiří, Pavel ŠTEFFAN, Ladislav MACHÁŇ, Ludvík LEDERER, Jiří LOSKOT a René ČECHMÁNEK. *Tenzometr určený do betonových konstrukcí*. Česká Republika. 28233 UV 2015-30870. Uděleno 19.03.2015. Zapsáno 19.05.2015. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028233.pdf>.
- [25] CHANG, Christiana, Gangbing SONG, Di GAO a Y L MO. Temperature and mixing effects on electrical resistivity of carbon fiber enhanced concrete. *Smart Materials and Structures*. 2013, **22**(3): 035021. DOI: 10.1088/0964-1726/22/3/035021. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=3/a=035021?key=crossref.bbc90955cc1470bcba1c0d68f30c640e>.
- [26] GESCHEIDTOVÁ, Eva, Miloslav STEINBAUER a Jiří REZ. *Měření v elektrotechnice*. 1. Brno: VUTUM, 2002, 182 s. ISBN 80-214-1990-3.
- [27] BARTUŠEK, Karel. *Měření v elektrotechnice*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTUM, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.

CURRICULUM VITAE

Jméno: Ladislav MACHÁŇ
Narozen: 05. 07. 1984 v Náchodě
Kontakt: machan@feec.vutbr.cz



Vzdělání

- 2008 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Postgraduální doktorské studium, obor Mikroelektronika a technologie, Státní doktorská zkouška vykonána v prosinci 2010, téma studia: Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou maticí
- 2006 – 2008 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Magisterské studium, obor Mikroelektronika, Státní zkouška vykonána v červnu 2008 s cenou děkana za diplomovou práci, Diplomová práce: Detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice
- 2003 – 2006 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Bakalářské studium, obor Mikroelektronika a technologie, Státní zkouška vykonána v červnu 2006, Bakalářská práce: Digitální záznamník teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku s možností dvoupolohové regulace

Praxe

- 2010 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**
Technicko-hospodářský pracovník
- 2015 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Centrum Transferu Technologí**
Manažer transferu technologií pro Fakultu elektrotechniky a komunikačních technologií

Jazyky

Angličtina

Dovednosti a znalosti

Vývoj elektronických zařízení, laboratorních měřicích přístrojů a embedded systémů. Programování v jazyce C a Assembler se zaměřením na mikrokontroléry. Návrh desek plošných spojů a kompletní technická příprava výroby. Návrh mechanického řešení přístrojů s využitím 3D CAD. Technologická příprava výroby mechanických dílů v softwaru CAM. Obrábění mechanických součástí na CNC.

Další aktivity

Spolupráce s průmyslem a s jinými institucemi.

Odborná stáž v *Technische Universität Ilmenau*, Ilmenau, Německo.

Účast na řešení řady projektů GAČR, MPO, GA AVČR, MŠMT, OP VK, OP VaVI

ABSTRACT

The dissertation thesis is focused on practical use of composite material with modified cement matrix. Especially the area of electrical behavior of composite materials in use has been examined, for strain sensing material. The experimental part solves the problematics of corrosion of carbon and metallic materials in alkaline environment of the cement matrix. The physical design of the sensor and its fabrication using functional composite cement material have been described here. The thesis has also discussed defining the influence of temperature change and humidity change on the change of electrical parameters of integrated sensors. An important part of the thesis is the area of evaluating a series of measurements of electrical parameters under dynamic loading. The thesis analyzes designed measurement method in detail, being suitable to determine electrical properties of cement composite materials including the construction of a monitoring system that enables practical application of sensors in complex structures.